

Кафедра автоматизації
технологічних процесів
і виробництв

Лабораторна робота № 3
з курсу
”Гідрогазодинаміка”

Дослідження втрат енергії
потoku у місцевих гідравлічних
опорах та на тертя
у трубопроводі

Методичні вказівки до лабораторної роботи № 3 "Дослідження втрат енергії потоку у місцевих гідравлічних опорах та на тертя у трубопроводі" з курсу "Гідрогазодинаміка". Шкодзінський О.К., Пісьціо В.П., Тернопіль: ТНТУ, 2018 - 16 с.

Для студентів напряму підготовки: 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

Автори: Шкодзінський О.К., Пісьціо В.П.

Розглянуто і затверджено на засіданні кафедри автоматизації технологічних процесів і виробництв (протокол № 1 від 29.08.2018 року)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ПОТОКУ У МІСЦЕВИХ ГІДРАВЛІЧНИХ ОПОРАХ ТА НА ТЕРТЯ У ТРУБОПРОВОДІ

Мета роботи: Вивчення емпіричних закономірностей для розрахунку гідравлічних втрат.
Вивчення методів розрахунку простих трубопроводів.

1. Короткі теоретичні відомості

1. Простим трубопроводом називають трубопровід, по якому рідина транспортується від живильника до приймача без проміжних відгалужень потоку.

Живильниками і приймачами в гідросистемах можуть бути різні пристрої – насоси і гідродвигуни, акумулятори, резервуари та ін.

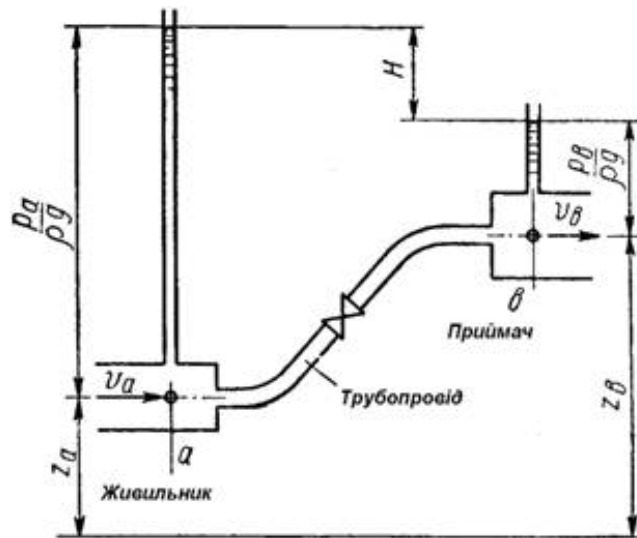


Рис.1

Трубопровід може мати постійний діаметр по всій довжині, або ж може складатися з ряду послідовно сполучених ділянок різного діаметру.

Початковим при розрахунках простого трубопроводу є рівняння балансу тисків (рівняння Бернуллі) для потоку від перерізу a в живильнику перед входом в трубопровід до перерізу b в приймачі після виходу рідини з трубопроводу. При усталеному русі рідини маємо

$$z_a + \frac{P_a}{\rho g} + \alpha_a \frac{V_a^2}{2g} = z_b + \frac{P_b}{\rho g} + \alpha_b \frac{V_b^2}{2g} + \sum h_s,$$

де $\sum h_s$ – сума втрат напору на шляху між вибраними перерізами, що складається з втрат на тертя по довжині і втрат в місцевих опорах, розташованих на трубопроводі. До місцевих втрат напору відносяться також втрата при вході потоку з живильника в трубопровід і при виході потоку з трубопроводу в приймач.

Для зручності розрахунків вводиться поняття наявного напору трубопроводу

$$H = \left(z_a + \frac{P_a}{\rho g} \right) - \left(z_b + \frac{P_b}{\rho g} \right),$$

який представляє перепад гідростатичних тисків в живильникові та приймачі і виражається різницею п'єзометричних рівнів в перерізах a і b .

Перетворивши рівняння балансу тисків, отримуємо загальний вигляд розрахункового рівняння простого трубопроводу

$$H = \alpha_b \frac{V_b^2}{2g} - \alpha_a \frac{V_a^2}{2g} + \sum h_{\text{с}} \quad (1)$$

Якщо площі перерізів живильника і приймача досить великі в порівнянні з перерізом трубопроводу (наприклад, трубопровід, що з'єднує два великих резервуари), швидкісними напорами рідини в цих перерізах можна при складанні балансу тисків знехтувати. При цьому розрахункове рівняння набуває вигляду

$$H = \sum h_{\text{с}} \quad (2)$$

відповідаючи процесу, в якому весь наявний напір затрачується на подолання гідравлічних опорів.

Рівняння (2) застосовне також незалежно від розмірів живильника і приймача в тих випадках, коли трубопровід має досить велику довжину, при якій швидкісні напори на вході і виході з трубопроводу виявляються дуже малими в порівнянні з втратами напору на тертя по його довжині.

2. Застосуємо рівняння (2) до простого трубопроводу, який з'єднує два великих резервуари з постійними рівнями рідини і складається з k послідовних ділянок довжиною l_i і діаметром d_i (рис. 2). Помітимо, що показані на схемі рівні рідини в резервуарах потрібно розглядати в більш загальному змісті як п'єзометричні рівні в живильнику і приймачі.

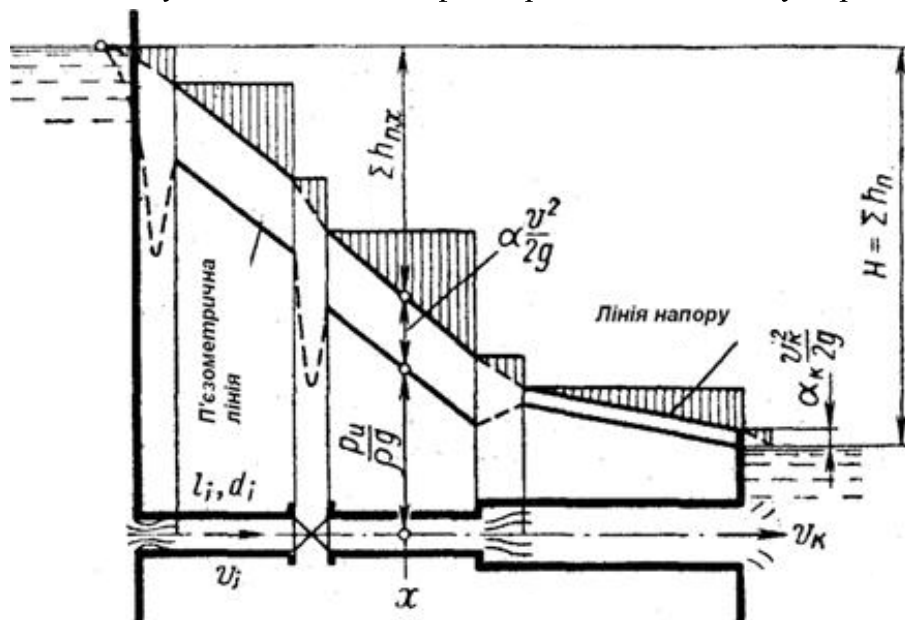


Рис.2

Виражаючи втрати на тертя по довжині і місцеві втрати напору загальними формулами

$$h_{\text{с.т}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}; \quad h_{\text{с.м}} = \zeta \frac{V^2}{2g},$$

отримаємо

$$H = \sum_1^k \left(\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \zeta_i \right) + \frac{V_i^2}{2g} + \alpha_k \frac{V_k^2}{2g},$$

де V_i – середня швидкість потоку в кожній ділянці; λ_i і ζ_i – коефіцієнт опору тертя і сумарний коефіцієнт місцевих опорів на кожній ділянці; V_k – середня швидкість потоку у вихідному

перерізі трубопроводу; $\alpha_k \frac{V_k^2}{2g}$ – втрата напору при виході з трубопроводу в резервуар, яка рівна швидкісному напору потоку у вихідному перерізі трубопроводу (для турбулентного режиму коефіцієнт кінетичної енергії $\alpha_k \gg 1$; для ламінарного режиму в круглій трубі $\alpha_k \gg 2$).

Використовуючи рівняння витрати

$$Q = V_1 F_1 = \dots = V_i F_i = \dots = V_k F_k, \quad (3)$$

отримаємо розрахункове рівняння трубопроводу в формі

$$H = \frac{V_k^2}{2g} \left[\alpha + \sum_{i=1}^k \left(\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \zeta_i \right) \left(\frac{F_k}{F_i} \right)^2 \right], \quad (4)$$

де F_k – площа вихідного перерізу трубопроводу; F_i – площа перерізу ділянки діаметром d_i .

Для простого трубопроводу довжиною l з постійним діаметром d рівняння при турбулентному режимі має вигляд

$$H = \frac{V_k^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right), \quad (5)$$

де $\sum \zeta$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів в трубопроводі.

Виразивши швидкість через витрату і визначаючи числовий множник при $g=9,81 \text{ м/с}^2$, отримаємо

$$H = 0,0827 \frac{Q^2}{d^4} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right). \quad (6)$$

Одиниці вимірювання величин у цій формулі: l, d, H – м; Q – м³/с.

У ряді задач на визначення пропускної здатності трубопроводу при турбулентному режимі руху доцільно приводити рівняння (5) до вигляду

$$V = \varphi \sqrt{2gH}; \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}},$$

де j – коефіцієнт швидкості трубопроводу. При цьому витрата виражається формулою

$$Q = \mu F \sqrt{2gH}, \quad (7)$$

де $m=j$ – коефіцієнт витрати і $F = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа перерізу трубопроводу.

У випадку витікання рідини з великого резервуара через трубопровід в атмосферу (рис. 3) рівняння Бернуллі має вигляд

$$H = \alpha_k \frac{V_k^2}{2g} + \sum h_e, \quad (8)$$

де H – наявний напір трубопроводу, який визначається висотою п'єзометричного рівня в резервуарі-живильнику над центром вихідного перерізу трубопроводу; $\alpha_k \frac{V_k^2}{2g}$ – швидкісний

напір у вихідному перерізі; $\sum h_e$ – сума втрат напору в трубопроводі.

Оскільки втрата напору при виході потоку з трубопроводу в даному випадку відсутня, рівняння (8) при підстановці в нього виразів втрат переходить в рівняння (4). Отже, приведена вище розрахункові залежності є спільними для трубопроводу з витіканням як під рівень, так і в атмосферу.

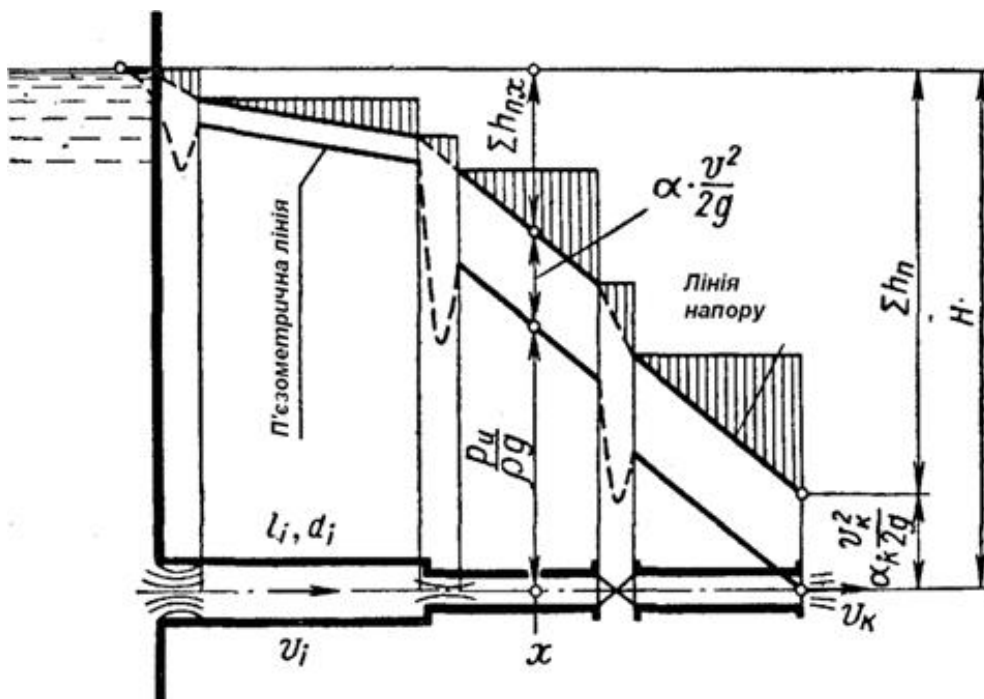


Рис.3

3. Графіки напорів, побудова яких подана на рис. 2 і 3 показують зміну по довжині трубопроводу повного напору потоку та його складових.

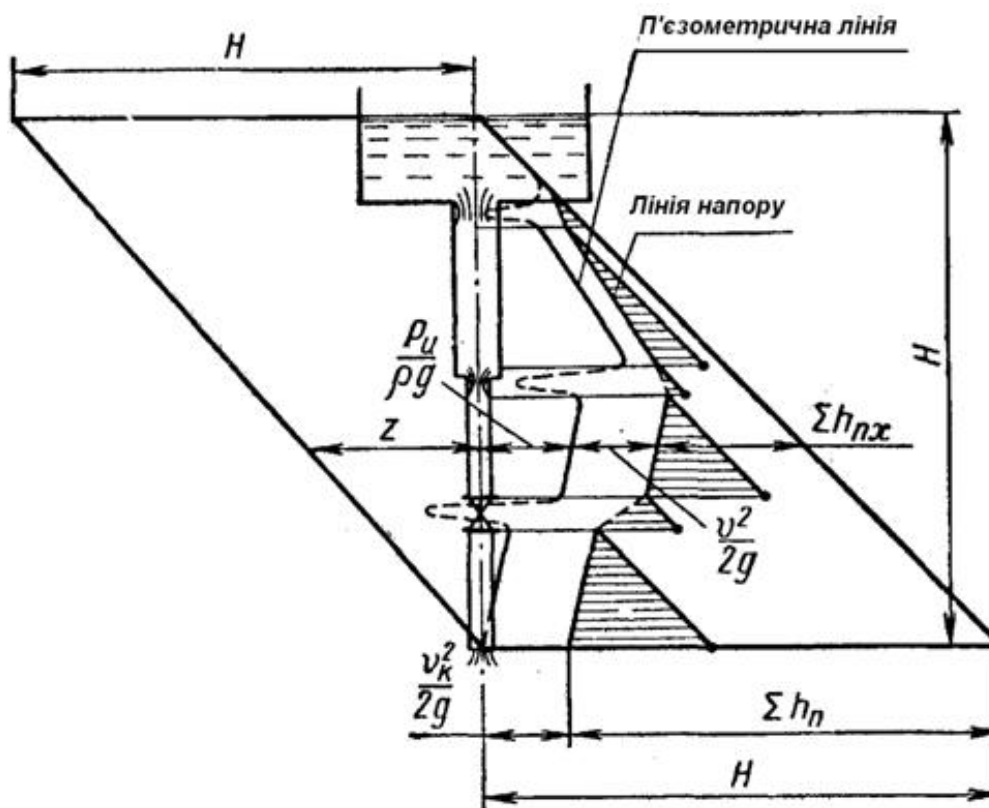


Рис.4

Лінія напору (питомої механічної енергії потоку) будується шляхом послідовного віднімання втрат, наростаючих вздовж потоку, з початкового напору потоку (заданого

п'єзометричним рівнем в живильному резервуарі). П'єзометрична лінія (яка задає зміну гідростатичного напору потоку) будується шляхом віднімання швидкісного напору в кожному перерізі від повного напору потоку.

Величина п'єзометричного напору $P_n / \rho g$ у кожному січенні (P_n – надлишковий тиск) визначається на графіку зануренням центра перерізу під п'єзометричною лінією; величина швидкісного тиску $\alpha V^2 / 2g$ – вертикальною відстанню між п'єзометричною лінією і лінією напору. Побудова лінії напору для вертикального трубопроводу подана на рис. 4. Напори в кожному перерізі відкладаються тут по горизонталі таким чином, щоб вісь труби була початком відліку п'єзометричних напорів.

4. Якщо частина довжини трубопроводу знаходиться під вакуумом (наприклад, сифонний трубопровід, рис. 5), необхідна перевірка величини найбільшого вакууму в небезпечному перерізі С:

$$\left(\frac{P_e}{\rho g} \right)_C = h + \frac{V^2}{2g} + \sum h_{e.C}, \quad (9)$$

де h – висота перерізу C над початковим п'єзометричним рівнем у баку-живильнику; V – швидкість у цьому перерізі; $\sum h_{e.C}$ – сума втрат напору на ділянці трубопроводу до цього перерізу.

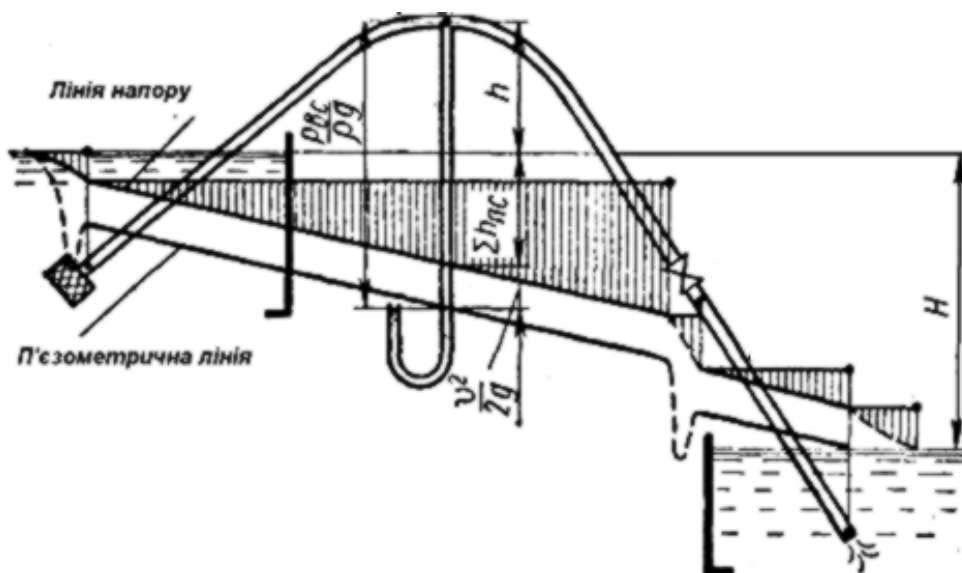


Рис.5

Для забезпечення нормальної (безкавітаційної) роботи трубопроводу повинна виконуватися умова

$$P_{e.C} < P_{atm} - P_{n.n},$$

де P_{atm} – атмосферний тиск; $P_{n.n}$ – тиск насичених парів рідини при даній температурі.

5. При досить великій відносній довжині l/d трубопроводу швидкісний напір $V^2 / 2g$ малий у порівнянні з загальною втратою напору в трубопроводі. Для довгого трубопроводу постійного діаметра розрахункове рівняння (5) або (6) можна тому замінити наближенням:

$$H = \frac{V^2}{2g} \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) = 0,0827 \frac{Q^2}{d^4} \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right). \quad (10)$$

При розрахунку довгих трубопроводів, у яких домінують втрати на тертя по довжині, доцільна заміна місцевих опорів еквівалентними довжинами

$$l_e = \frac{\zeta d}{\lambda} \quad (11)$$

При такій заміні розрахункове рівняння (10) можна представити у формі, що відповідає трубопроводу без місцевих опорів:

$$H = \lambda \frac{L V^2}{d 2g} = 0,0827 \lambda \frac{L}{d^5} Q^2, \quad (12)$$

де $L = l + \sum l_e$ – приведена довжина трубопроводу.

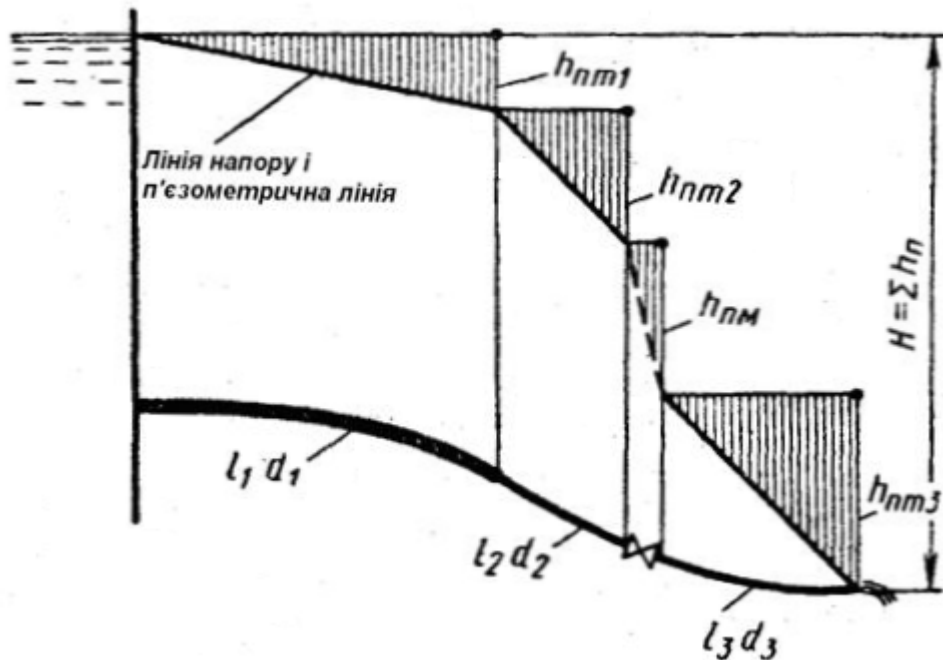


Рис.6

Для трубопроводу, що складається з k послідовних ділянок різного діаметра, маємо аналогічне співвідношення

$$H = 0,0827 Q^2 \sum_{i=1}^k \lambda \frac{L_i}{d_i^5} \quad (13)$$

Графік напорів для довгого трубопроводу будується спрощено (рис. 6), оскільки відносна малість швидкісних напорів дозволяє розглядати лінію напору і п'єзометричну лінію як практично співпадаючі.

6. Розрахунок трубопроводу на основі приведених вище співвідношень зв'язаний з вибором коефіцієнтів місцевих опорів ζ і коефіцієнтів опору тертя λ . Значення ζ при турбулентному режимі див. Л.р. № 2. Значення λ при різних режимах руху рідини визначаються наступними залежностями:

1. Ламінарний режим ($Re \leq 2000$). Коефіцієнт опору тертя $\lambda = \frac{64}{Re}$ і втрата напору на тертя

$$h_{e.m} = \frac{32 \nu l V}{g d^2} = \frac{128 \nu l Q}{\pi g d^4} \quad (14)$$

2. Турбулентний режим ($Re \geq 3000$):

а) Область гідравлічно гладких труб. Коефіцієнт опору тертя може визначатися по формулі Конакова

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}, \quad (15)$$

і формулі Блазіуса

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (Re \leq 10^5), \quad (16)$$

відповідно до якої втрата напору на тертя (величини – у міжнародній системі одиниць)

$$h_{\text{тр.м}} = 0,0246 \frac{v^{0,25} l Q^{1,75}}{d^{4,75}}. \quad (17)$$

Залежність λ від Re для гідравлічно гладких труб

Re	λ	Re	λ	Re	λ
4000	0,0400	40000	0,0225	400000	0,0140
6000	0,0360	60000	0,0200	600 000	0,0130
8000	0,0335	80000	0,0190	800000	0,0120
10000	0,0315	100000	0,0180	1 000 000	0,0115
15000	0,0285	150 000	0,0165	2 000 000	0,0105
20000	0,0270	200 000	0,0155	3 000 000	0,0100

До зазначеної області опору відносяться технічно гладкі труби (суцільнотягнені з кольорових металів – мідні, латунні, свинцеві; скляні труби та ін.) у всьому діапазоні їхнього практичного використання по числах Re , а також сталеві труби до значень числа Рейнольдса, орієнтовно рівних $Re_{\text{кр}} = 20 \frac{d}{\Delta}$ (Δ – еквівалентна абсолютна шорсткість).

б) Перехідна область. Збігання значень λ з дослідними даними дає універсальна формула Альтшуля (застосовна у всіх областях турбулентного режиму)

$$\lambda = 0,1 \left(\frac{1,46 \Delta}{d} + \frac{100}{Re} \right)^{0,25}. \quad (18)$$

Середні значення еквівалентної шорсткості для сталевих суцільнотягнених труб нових $\Delta = 0,1$ мм та бувших у використанні $\Delta = 0,2$ мм. Верхня границя перехідної області орієнтовно визначається виразом

$$Re_{\text{кр}} = 500 \frac{d}{\Delta}.$$

в) Область гідравлічно шорстких труб (квадратична область).

Значення λ як функції d/Δ визначаються формулою Нікурадзе

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{d}{\Delta} + 1,14\right)^2}, \quad (19)$$

або по близькій до неї формулі Шіфрінсона

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d}\right)^{0,25}. \quad (20)$$

Для старих водопровідних (сталевих і чавунних) труб з корозією ($\Delta \approx 1$ мм), застосовна також формула (d в м)

$$\lambda = \frac{0,02}{d^{1/3}}. \quad (21)$$

Залежність λ від d/Δ у квадратичній області

$\frac{d}{\Delta}$	λ	$\frac{d}{\Delta}$	λ	$\frac{d}{\Delta}$	λ
100	0,0379	1100	0,0192	2500	0,0159
200	0,0304	1200	0,0188 0,0184	3000	0,0153 0,0148
300	0,0269	1300		3500	
400	0,0249 0,0234	1400	0,0181 0,0178	4000	0,0144 0,0137
500	0,0223 0,0216	1500	0,0176 0,0173	5000	0,0132 0,0128
600	0,0207 0,0202	1600	0,0171 0,0169	6000	0,0125 0,0122
700	0,0197	1700	0,0167	7000	0,0120
800		1800		8000	
900		1900		9000	
1000		2000		10000	

Для труб некруглого перерізу (наприклад, прямокутні, овальні та ін.) втрати напору на тертя по довжині виражаються загальною формулою

$$h_{e.л} = \lambda \frac{l}{D_e} \frac{V^2}{2g}$$

у який V – середня по перерізі швидкість; D_e – гідравлічний діаметр перерізу. Останній представляє відношення площі F перерізу труби до її периметру S :

$$D_e = \frac{4F}{S}$$

і для круглої труби співпадає з геометричним діаметром ($D_e=d$).

Значення коефіцієнта опору тертя λ знаходять по формулах, приведених вище для круглих труб, із заміною в них діаметра d на D_e .

7. Можна розрізняти три основні задачі розрахунку простого трубопроводу, методика рішення яких приводиться нижче на прикладі трубопроводу постійного діаметру.

Задача I. Задані: витрата рідини Q , її властивості (ν), розміри трубопроводу l , d і шорсткість його стінок D .

Знайти необхідний напір H .

Порядок рішення задачі:

1. По відомих Q , d , ν знаходиться число Рейнольдса $Re=4Q/\pi d\nu$ і визначається режим руху рідини.

2. У випадку ламінарного режиму напір H знаходиться з формули

$$H = \frac{128\nu L}{\pi g d^4} Q, \quad (22)$$

де L – приведена довжина трубопроводу, рівна $L=l + \sum l_e$; еквівалентні довжини l_e місцевих опорів при ламінарному режимі в трубопроводі істотно залежать від числа Рейнольдса

$$\frac{l_e}{d} = f(Re).$$

При турбулентному режимі напір H визначається з формул (6) (короткий трубопровід) або (12) (довгий трубопровід з переважними втратами на тертя), у яких по відомих Re , d і D вибираються відповідні величини l , z і l_e .

Задача II. Задані: наявний напір H , розміри трубопроводу l , d , шорсткість його стінок D і властивості рідини (ν).

Знайти витрату Q .

1. Визначається режим руху шляхом порівняння напору H з його критичним значенням:

$$H_{кр} = \frac{32\nu^2 L}{gd^3} Re_{кр}. \quad (23)$$

Якщо $H < H_{кр}$, режим ламінарний, якщо $H > H_{кр}$ – турбулентний.

2. Задача розв'язується методом послідовних наближень. У випадку ламінарного режиму витрата визначається з формули (22), у якій послідовними наближеннями уточнюються обрані значення еквівалентних довжин місцевих опорів і приведеної довжини трубопроводу L .

У випадку турбулентного режиму як перше наближення приймається квадратична область опору, у якій по відомих d і D визначаються значення l і z , що дозволяє знайти з формул (6) або (12) витрату Q . Підрахунок Re по знайденому Q дає можливість уточнити значення коефіцієнтів опорів і визначити витрату в другому наближенні, що виявляється достатнім.

Для технічно гладких труб як перше наближення доцільно використовувати при знаходженні витрати формулу Блазіуса, по якій маємо

$$h_{н.м} = 0,0246 \frac{\nu^{0,25} L Q^{1,75}}{d^{4,75}}, \quad (24)$$

причому варто попередньо оцінити приведену довжину трубопроводу L з врахуванням наявних місцевих опорів.

Доцільний також графічний розв'язок задачі, що полягає у побудові характеристики трубопроводу – графіка залежності необхідного напору H (перепаду гідростатичних напорів)

від витрати Q (рис. 7).

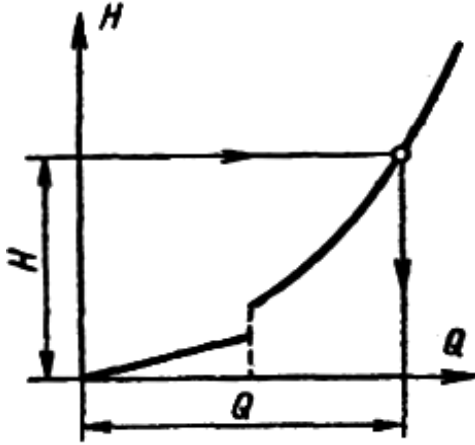


Рис.7

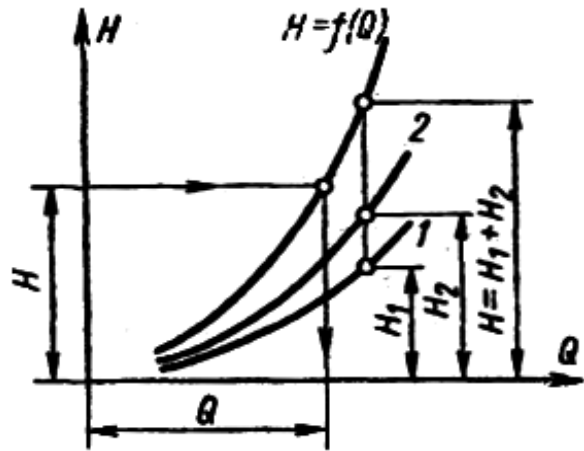


Рис.8

Характеристика будується по рівняннях взаємозв'язку між H і Q , приведених вище для ламінарного і турбулентного режимів, з урахуванням залежності l і z від Re , тобто від витрати Q .

Відмітимо, що при турбулентному режимі в трубопроводі значення z у більшості випадків дуже слабо залежать від Re і в розрахунках можуть прийматися постійними.

Для довгого трубопроводу зазначена характеристика може розглядатися як залежність сумарних втрат напору в трубопроводі від витрати:

$$\sum h_s = f(Q).$$

Графічний прийом, що виключає необхідність у послідовних наближеннях, особливо зручний для трубопроводу з декількох ділянок різного діаметру, характеристика якого, що дозволяє знаходити витрату Q по напору H , отримується підсумовуванням ординат характеристик окремих ділянок (рис. 8).

Задача III. Задані: наявний напір H , витрата Q , довжина трубопроводу l , шорсткість його стінок D і властивості рідини (ν).

Знайти діаметр трубопроводу d .

1. Визначається режим руху шляхом порівняння напору H з його критичним значенням

$$H_{кр} = \frac{\pi^3 \nu^5 L}{2gQ^3} Re_{кр}^4. \quad (25)$$

Якщо $H < H_{кр}$, режим ламінарний, якщо $H > H_{кр}$ – турбулентний.

2. Задача розв'язується графічно, шляхом побудови залежності необхідного напору H від діаметра трубопроводу d при заданій витраті Q . Задаючи ряд значень d , для кожного з яких визначаються величини l , z , і l_e з врахуванням області опору, обчислюють відповідні значення напору H із приведених вище рівнянь зв'язку між H і Q .

Результати підрахунків зводяться в графік $H=f(d)$ (рис. 9), що дозволяє по заданому H визначити d і далі уточнити необхідну величину H при виборі найближчого більшого стандартного діаметра.

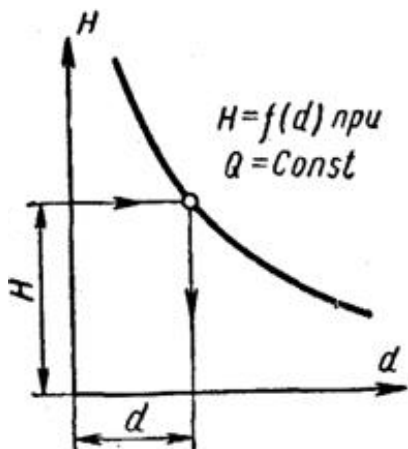
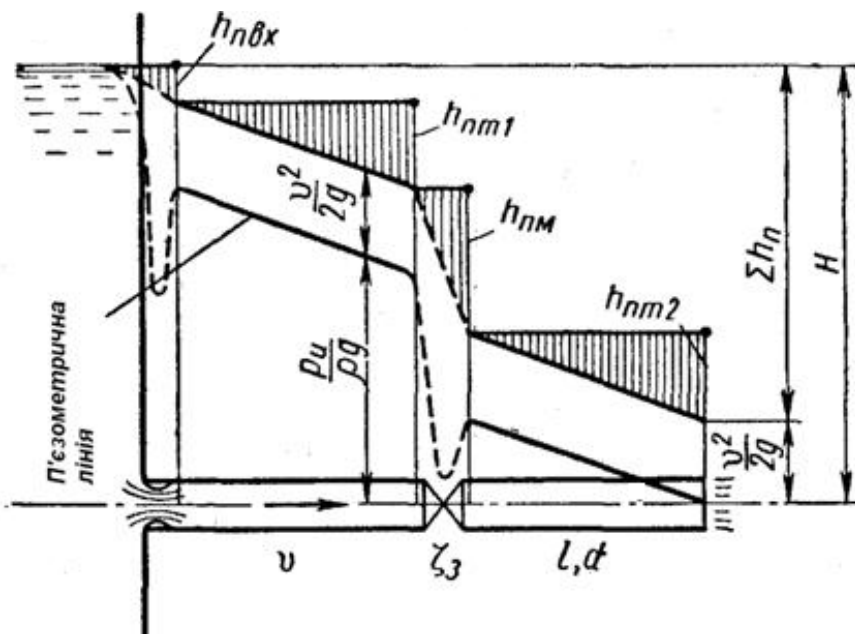


Рис.9.....Рис.10



8. Як приклад розрахунку короткого трубопроводу визначимо швидкість витікання і витрату для труби довжиною l і діаметром d при заданому напорі H (рис. 10) і для тієї ж труби з приєднаним до неї збіжним або розбіжним насадком (рис. 11 і 12); режим руху рідини вважається турбулентним.

Для труби без насадка одержимо по формулі (5)

$$H = \frac{V^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \zeta_{вх} + \zeta_3 \right),$$

звідки швидкість витікання

$$V = \varphi \sqrt{2gH}; \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \frac{l}{d} + \zeta_{вх} + \zeta_3}},$$

і витрата

$$Q = \mu F_1 \sqrt{2gH}, \quad \text{де } \mu = \varphi \text{ і } F_1 = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Значення коефіцієнтів місцевих опорів (входу $z_{вх}$ і засувки z_3) і коефіцієнта опору тертя λ в першому наближенні визначаються в припущенні квадратичної області опору.

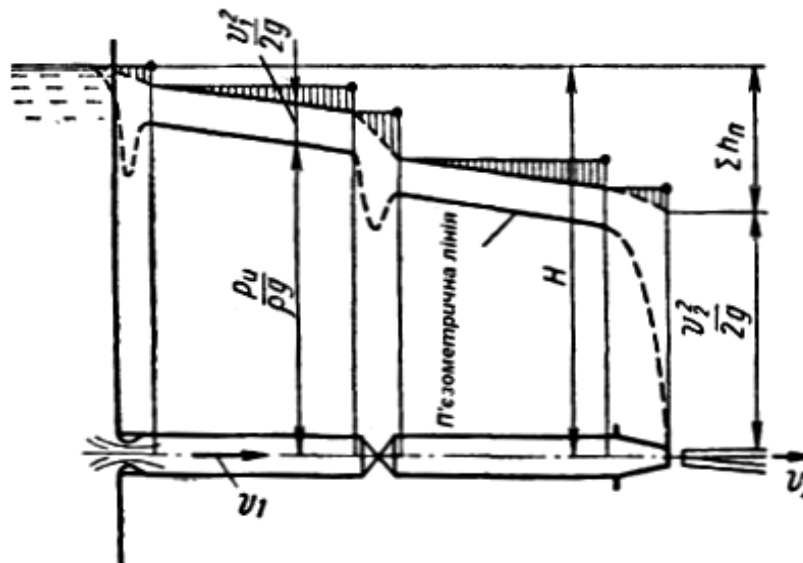


Рис.11

Для труби з насадкою вихідною площею F_2 і коефіцієнтом опору ζ_n одержимо по формулі (4)

$$H = \frac{V_2^2}{2g} \left[1 + \zeta_n + \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_{ex} + \zeta_s \right) \frac{F_2^2}{F_1^2} \right]$$

звідки швидкість витікання

$$V_2 = \varphi \sqrt{2gH}; \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_n + \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_{ex} + \zeta_s \right) \frac{F_2^2}{F_1^2}}}$$

і витрата $Q_2 = \mu F_2 \sqrt{2gH}$; $\mu = \varphi$ (при відсутності стиснення струменя на виході з насадки).

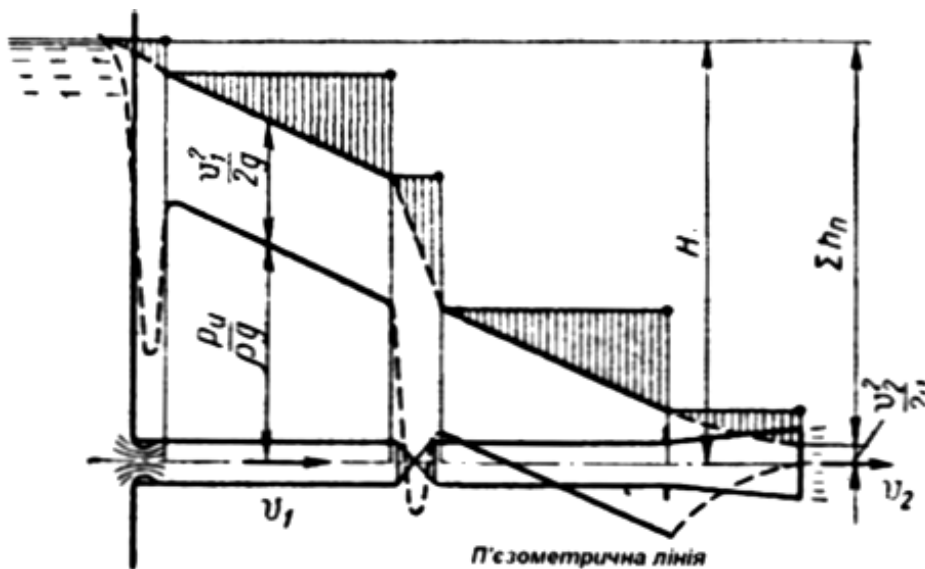


Рис.12

Порівняння формул для коефіцієнта швидкості j показує, що приєднання звужуючого насадка ($F_2 < F_1$), коефіцієнт опору якого завжди представляє малу величину, збільшує швидкість витікання ($V_2 > V$). Звідси, частково, випливає, що при розрахунку трубопроводу з

таким насадком не можна нехтувати швидкісним напором виходу навіть при великій відносній довжині l/d трубопроводу. Приєднання розширюваного насадка ($F_2 > F_1$) зменшує швидкість витікання ($V_2 < V$).

Щоб з'ясувати, як змінюється витрата, знайдемо швидкість у трубі

$$V_1 = V_2 \frac{F_2^2}{F_1^2} = \frac{\sqrt{2gH}}{\sqrt{(1+\zeta_*) \frac{F_2^2}{F_1^2} + \lambda \frac{l}{d} + \zeta_{ex} + \zeta_s}}.$$

Приєднання звужуючої насадки зменшує швидкість у трубі $V_1 < V$ і, отже, витрату Q ($V_1 \rightarrow 0$ при $F_2 \rightarrow 0$). Для розширюваного насадка $V_1 > V$, і витрата збільшується.

Ці зміни витрати зв'язані з тим, що в кінцевому перерізі труби перед звужуючою насадкою виникає надлишковий тиск, а перед розширюваною насадкою – вакуум (див. графіки напорів).

2. Хід роботи

1. Запустити на виконання файл GGDLab3.exe
2. Переглянути схему установки і натиснути кнопку “ОК”.
3. Для того щоб приступити до виконання лабораторної роботи необхідно успішно скласти тестування.
4. Для початку тестування необхідно натиснути кнопку “Почати тест”.
5. Прочитати запитання і вибрати правильні відповіді із запропонованих, натиснути кнопку “Ввід”.
6. Комп'ютер повідомить про те чи ви дали правильну відповідь.
7. Для продовження натиснути кнопку “Наступне запитання”
8. Продовжити тестування поки не з'явиться кнопка “Кінець”, натиснути її після чого на екрані з'явиться повідомлення про допуск до роботи. Якщо ви не пройшли тестування потрібно, з дозволу викладача, спробувати ще раз.
9. В полі “№ Залікової книжки” ввести номер власної залікової книжки.
10. Одержати у викладача коефіцієнт опору крана і встановити це значення у відповідному полі.
11. Натиснути кнопку “ПОБУДУВАТИ ГРАФІК”.
12. Записати вихідні дані, які комп'ютер підібрав згідно номера залікової книжки.
13. Перенести на міліметровий папір графіки повного і п'єзометричного напорів.
14. Оцінити величини місцевих втрат напору в трубопроводі в залежності від зміни коефіцієнта опору крана, змінюючи його значення у відповідному полі.
15. Зобразити на міліметровому папері графік зміни швидкісного напору вздовж трубопроводу.
16. Зобразити на міліметровому папері графік зміни витрати Q через трубопровід в залежності від опору крана $z_{кр}$.

3. Структура звіту по лабораторній роботі

1. Назва роботи.

2. Мета роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Результати досліджень і розрахунків.
5. Висновки.

4. Контрольні запитання

1. Основи гідродинамічної подібності потоків.
2. Режими руху рідини. Досліди Рейнольдса.
3. Турбулентне перемішування в потоці. Вплив поверхні стінок трубопроводу на потік. Гідравлічно гладкі та шорсткі труби.
4. Розрахунок втрат енергії при турбулентному русі.
5. Розрахунок середньої швидкості потоку. Формула Шезі.
6. Розрахунок простих коротких трубопроводів.
7. Прості короткі трубопроводи, що працюють при тиску, меншому за атмосферний.
8. Розрахунок довгих трубопроводів.
9. Гідравлічний розрахунок розгалужених мереж.
10. Основи розрахунку газопроводів при малих і великих перепадах тиску.

5. Література

1. Левицький Б.Ф., Лещій Н.П. Гідр авліка. Загальний курс. – Львів: Світ 1994. – 264 с.
2. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : Учебник для машиностроительных вузов / Т.М.Башта, С.С.Руднев, Б.Б.Некрасов и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
3. Задачник по гидравлике, гидромашинам и гидроприводу. Учебное пособие для вузов / Под ред. Б.Б.Некрасова. – М.: Высшая школа, 1989. – 192 с.
4. Сборник задач по машиностроительной гидравлике / Под ред. И.И.Куколевского и Л.Г.Подвидза. – М.: Машиностроение, 1981. – 367 с.